

# 全沙漠砂纤维水泥基复合材料单轴受压尺寸效应试验研究

张朵<sup>1</sup>,夏多田<sup>1,2</sup>,程建军<sup>1,2</sup>,生兆亮<sup>1</sup>,周长乐<sup>1</sup>

(1. 石河子大学水利建筑工程学院,832003 石河子;  
2. 新疆兵团高烈度寒区建筑抗震节能技术工程实验室,832003 石河子)

**摘要:**为探究新疆地区全沙漠砂制备水泥基复合材料 ECC (engineered cementitious composite) 的可行性,并研究全沙漠砂 ECC 的单轴受压尺寸效应,在对沙漠砂、石英砂和河砂三种骨料制备的 ECC 宏观力学性能及微观结构分析比较的基础上,重点对 5 组不同尺寸的沙漠砂 ECC 试件进行了单轴压缩性能试验。结果表明:在相同的材料配比下,完全使用沙漠砂制备的 ECC,其抗压、抗拉以及抗折强度均与其余两种砂制备的 ECC 相近,沙漠砂 ECC 中纤维表面较少的附着物和较为完整的形貌对其发挥桥联作用有益;全沙漠砂 ECC 单轴受压性能具有尺寸效应;提出的高厚比与抗压强度的关系表达式、不同高厚比的应力-应变全曲线模型均与试验结果吻合较好。

**关键词:**纤维混凝土;沙漠砂;水泥基复合材料;微观结构;尺寸效应;应力-应变曲线

中图分类号:TU528

文献标志码:A

## Experimental study on size effect of fiber engineered cementitious composites prepared entirely by desert sand subjected to uniaxial compression

ZHANG Duo<sup>1</sup>, XIA Duotian<sup>1,2</sup>, CHENG Jianjun<sup>1,2</sup>, SHENG Zhaoliang<sup>1</sup>, ZHOU Changle<sup>1</sup>

(1. College of Water Conservancy & Architectural Engineering, Shihezi University, 832003 Shihezi, China;  
2. Laboratory of Earthquake Resistant Energy-saving Technology for High-intensity Cold Regions  
of Xinjiang Production and Construction Corps, 832003 Shihezi, China)

**Abstract:** In order to explore the feasibility of using desert sand entirely to prepare engineered cementitious composites (ECCs) in Xinjiang region, and study the uniaxial compression size effect of ECCs which are prepared entirely from desert sand, on the basis of analyzing and comparing the macroscopic mechanical properties and microstructure of ECCs prepared by three aggregates (i. e., desert sand, quartz sand, and river sand), the uniaxial compression tests of five groups of desert sand ECC specimens with different sizes were carried out. The results show that at the same ratio of materials, the ECCs prepared entirely by using desert sand have compressive, tensile, and flexural strength similar to that of the ECC prepared by

收稿日期:2021-10-25

修回日期:2022-03-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 52168026);兵团青年科技创新领军人才计划资助项目(No. 2019CB023)

通信作者:夏多田,副教授。E-mail:xdt\_xx@shzu.edu.cn

引用格式:张朵,夏多田,程建军,等.全沙漠砂纤维水泥基复合材料单轴受压尺寸效应试验研究[J].应用力学学报,2023,40(1):127-134.

ZHANG Duo, XIA Duotian, CHENG Jianjun, et al. Experimental study on size effect of fiber engineered cementitious composites prepared entirely by desert sand subjected to uniaxial compression [J]. Chinese journal of applied mechanics, 2023, 40(1): 127-134.

the other two kinds of sand, in desert sand ECCs, fewer attachments and relatively complete morphology of fiber surface are beneficial to its bridging effect; the uniaxial compression properties of ECC prepared entirely by using desert sand have size effect; the expression of the relation between height-thickness ratio and compressive strength, and the stress-strain full curve model with different height-thickness ratio are in good agreement with the test results.

**Key words:** fibre reinforced concrete; desert sand; engineered cementitious composite; microstructure; size effect; stress-strain curve

工程水泥基复合材料(engineered cementitious composite, ECC)是一种具有高强度、高延性、高耗能、高拉伸应变和多重开裂性能的高延性纤维混凝土,可明显提高混凝土结构的性能<sup>[1-3]</sup>,在实际应用方面具有广泛的前景。

砂是制备ECC的重要组成原料。一方面,传统的ECC需要采用价格昂贵的石英砂为骨料;另一方面,当前用于替代石英砂的普通河砂,面临存量短缺价格上涨的趋势<sup>[4]</sup>;这严重阻碍了ECC在工程中的推广应用。我国西北地区沙漠砂资源丰富,为解决上述问题,近几年,众多学者提出了利用沙漠砂替代石英砂和普通砂制备高延性水泥基复合材料的新思路。研究表明:沙漠砂的粒径大小符合ECC材料对骨料粒径的要求;沙漠砂部分替代河砂制备的ECC单轴抗压强度与石英砂ECC的单轴抗压强度相比略低,但与河砂ECC的单轴抗压强度相比较高<sup>[5]</sup>;与石英砂ECC、普通河砂ECC的抗压强度相比,全沙漠砂ECC的抗压强度有所降低<sup>[6-8]</sup>,而对于劈裂抗拉强度和抗折强度,全沙漠砂ECC虽低于河砂ECC,但高于石英砂ECC<sup>[9]</sup>。

作为混凝土材料的固有特性,尺寸效应早在1925年就引起了学者的注意<sup>[10]</sup>。尺寸效应是指随着材料几何尺寸的变化,其力学性能不再是一个常数,而是随着其几何尺寸的变化而变化的现象<sup>[11]</sup>。由于ECC与普通混凝土在原料组成、制备工艺及性能上有很大的差异<sup>[12]</sup>,因此其单轴受压性能尺寸效应引起了学者的关注。结果表明,ECC的抗压性能存在尺寸效应且与普通混凝土存在差异:ECC试件在破坏时没有出现类似于普通混凝土的锥形破坏和严重的剥落现象,试件完整性较好<sup>[12-14]</sup>;高厚比越大,试件破坏的裂缝与压应力作用方向之间的夹角越小<sup>[15]</sup>;当高厚比大于1时,其对材料抗压强度的影响逐渐降低<sup>[13,15]</sup>;立方体试件截面尺寸越大,材料抗压强度越小<sup>[16]</sup>。但上述对于尺寸效应的研究主要是针对普通砂制备的ECC材料,而采用全沙漠砂制

备的ECC材料的抗压尺寸效应成果,鲜有报道。

基于上述问题,本研究在前人研究的基础上,首先对采用全沙漠砂、石英砂以及河砂制备的ECC的宏观力学性能及其微观结构进行比较研究,然后重点研究了全沙漠砂ECC的单轴受压尺寸效应。本研究完善了沙漠砂ECC的有关理论,为推广沙漠砂ECC在工程中的应用提供支撑。

## 1 试验概况

### 1.1 试验原材料及配合比

试验材料包括细骨料、水泥、粉煤灰、硅粉、纤维、胶粉和减水剂等。其中,水泥为新疆石河子市天能水泥有限公司的P·O 42.5级普通硅酸盐水泥;纤维为进口聚乙烯醇(polyvinyl alcohol, PVA)纤维,其微观形貌见图1,主要参数见表1<sup>[17]</sup>。

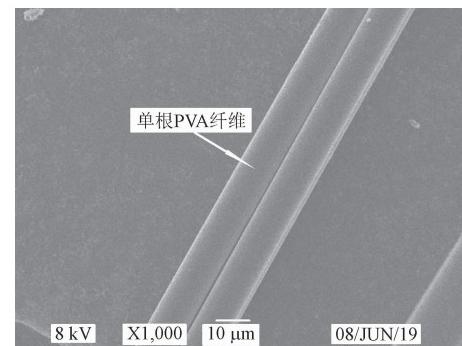


图1 PVA纤维扫描电镜图

Fig. 1 SEM image of PVA fiber

粉煤灰为新疆石河子市越隆达有限责任公司的I级粉煤灰;硅粉为新疆石河子合盛硅业有限公司的硅粉;沙漠砂为新疆境内的沙漠粉细砂,其主要化学成分及含量见表2<sup>[17]</sup>,石英砂和河砂均为新疆石河子市售产品,3种砂的筛分情况见文献[9];可再分散性乳胶粉为石河子本地所售产品;减水剂为石河子长虹外加剂厂生产的聚羧酸高效减水剂。本次

试验材料配合比详见表 3。

表 1 PVA 纤维主要参数

Tab. 1 The main parameters of PVA fiber

纤维	密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	抗拉强度/ MPa	弹性模量/ GPa	直径/ μm	长度/ mm
PVA	1.3	1 700	39	31	12

表 2 沙漠砂主要化学成分与含量

Tab. 2 The main chemical composition and content of desert sand

成分	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	CaO	K <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO
含量/%	67.10	17.90	4.94	4.22	3.48	1.35	0.843

表 3 试验配合比

Tab. 3 The mix ratio of test

材料	水泥	沙漠砂	粉煤灰	PVA 纤维	水	减水剂
掺量/ (kg·m <sup>-3</sup> )	223.46	670.37	558.64	26	296.84	8.25

## 1.2 试件制作与设计

试件设计详见表 4, 试验中试件的具体制作过程及养护制度见文献[17], 养护完成后进行力学性能的测试。

表 4 试件尺寸数量表

Tab. 4 Specimen size and quantity

试验类型		尺寸/mm	试件数量/个
3 种砂对比试验	抗压试验	100×100×100	9
	抗拉试验	260×60×13	9
	抗折试验	40×40×160	9
单轴压缩试验	立方体	70.7×70.7×70.7	6
		100×100×100	9
棱柱体	150×150×150	6	
	100×100×300	9	
	100×100×400	9	

注: 立方体中 100 mm×100 mm×100 mm 的试件和棱柱体试件的试验结果用于不同高厚比之间的比较。

表 5 试验机所得位移与试件实际变形对比(单位:mm)

Tab. 5 The displacement obtained by the testing machine is compared with the actual deformation of the specimen (unit:mm)

试件尺寸	试验机所得位移	压缩后轴向高度			轴向压缩变形			平均轴向压缩变形	
		1	2	3	1	2	3		
70.7	1	20	50.74	51.09	51.27	19.96	19.61	19.41	19.67
	2		51.29	51.03	51.01	19.41	19.67	19.69	19.59
	3		50.37	50.50	50.31	20.33	20.20	20.39	20.31

## 1.3 试验方法

根据规范<sup>[18-20]</sup>, 对试件进行力学性能测试。轴心受压试验中对于用来进行不同高厚比比较的组别, 首先将每组中的 6 个试件加载至破坏, 以确定峰值荷载, 然后对剩下的 3 个试件进行应力-应变全曲线的加载测试。设备为长春试验机研究所生产的电液伺服万能试验机, 试验加载速率为 0.2 mm/min, 由于试验室条件限制, 未能直接测得试件受压时的应力与应变, 而是将试验机自动采集的荷载除以试件的受压面积作为试件的压应力, 将试验机压头的位移除以试件的高度作为试件的压应变, 得到名义上的受压“应力-应变曲线”。参考文献[21]所用方法, 选择 70.7 mm 的立方体试件测量其尺寸变化, 与试验机所得位移进行对比, 以保证单轴受压试验结果的准确性, 对比结果如表 5 所示。可知试验机所得位移与试件实际变形是较为接近的, 因此取得应力-应变曲线的方法具有一定的可靠性。试件加载示意图如图 2 所示。



图 2 试件加载示意图

Fig. 2 Specimen loading diagram

## 2 试验结果与分析

### 2.1 3种砂制备的ECC的力学性能与微观结构

#### 2.1.1 3种砂制备的ECC的力学性能

3种砂制备的ECC的力学性能试验结果见表6。为综合分析3种ECC的力学性能,采用雷达图对其试验结果进行分析,结果如图3所示。

表6 3种砂制备的ECC的力学性能试验结果

Tab. 6 Mechanical properties test results of ECC prepared by three types of sand

砂类别	组别	参数			
		试件 数量/个	平均强度/ MPa	标准差/ MPa	变异 系数
沙漠砂	DSEY	3	抗压	42.11	1.17
	DSEL	3	抗拉	5.48	0.36
	DSEZ	3	抗折	11.62	0.48
石英砂	QSEY	3	抗压	43.80	0.96
	QSEL	3	抗拉	3.91	0.07
	QSEZ	3	抗折	10.23	0.59
河砂	RSEY	3	抗压	48.47	1.10
	RSEL	3	抗拉	3.67	0.18
	RSEZ	3	抗折	12.68	0.49

注:组别中DSE、QSE、RSE分别指沙漠砂ECC、石英砂ECC、河砂ECC;Y、L、Z分别指抗压、抗拉、抗折试验,即DSEY表示沙漠砂ECC的抗压试验。

从图3可以看出,3种砂制备的ECC的强度大小顺序分别为:抗拉强度,沙漠砂>石英砂>河砂;抗压强度,河砂>石英砂>沙漠砂;抗折强度,河砂>沙漠砂>石英砂。虽然沙漠砂ECC的抗压强度和抗折强度相对其他两种砂制备的ECC的抗压强度和抗折强度较低,但其轴心抗拉强度优于其他两种ECC的轴心抗拉强度。以本试验所得抗压强

度为例对其机理进行分析:河砂颗粒级配良好,掺入ECC中能形成良好的骨架有利于强度的发展,同时外观形貌较为圆润,有利于纤维的拔出,发挥其增强增韧作用,最终表现为抗压强度最大;对于石英砂虽然其颗粒级配良好,外观形貌较粗糙尖锐能够互相咬合增强ECC的强度,但其锐利的棱角可能会对纤维表面造成破坏,从而削弱纤维的作用<sup>[22]</sup>,因此其抗压强度低于河砂ECC;对于沙漠砂,其表面更为圆滑,对纤维作用的发挥有着积极的影响<sup>[5]</sup>,但其较差的颗粒级配、较大的比表面积和较高的砂灰比(本次试验砂灰比为3,大于文献[23]所提出的阈值1.41)造成ECC中含有较多、较大的孔隙<sup>[9,23-25]</sup>,最终使得其抗压强度与河砂ECC和石英砂ECC的抗压强度相比较低。根据图3线条所围成的图形面积大小综合评定3种砂所制备的ECC的力学性能,可知全沙漠砂替代其他两种砂制备ECC是完全可行的。

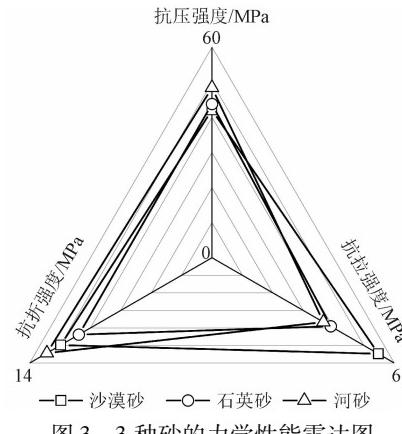


图3 3种砂的力学性能雷达图

Fig. 3 Radar chart of mechanical properties of three types of sand

#### 2.1.2 3种砂制备的ECC的微观结构分析

为进一步研究3种砂所制备的ECC力学性能差异的机理,对抗折试验后的试件取样进行扫描电镜测试,结果如图4所示。

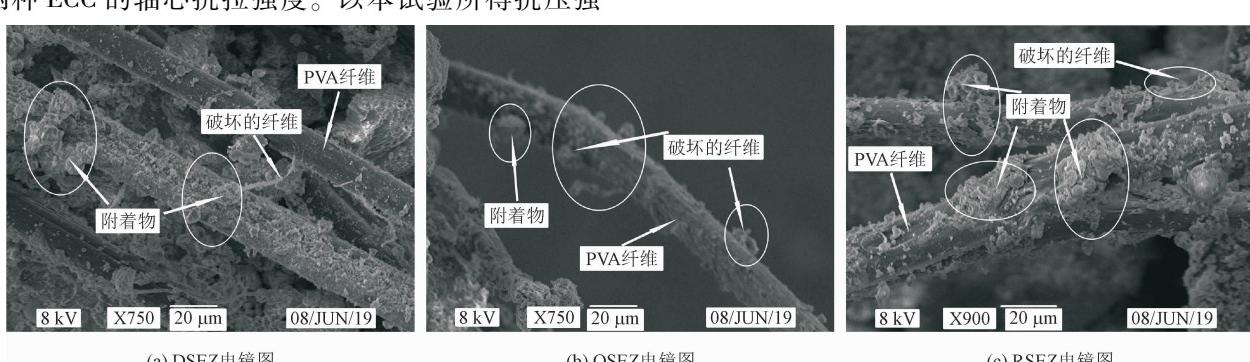


图4 3种砂所制备ECC的微观形貌图

Fig. 4 The microtopography of ECC prepared by three types of sand

从图 4 可知,对于纤维表面的附着物,河砂 ECC 最多,其次是沙漠砂 ECC,而石英砂 ECC 最少;对于纤维形貌,沙漠砂 ECC 和河砂 ECC 中纤维形貌较完整,表面有轻微的刮削痕迹,而石英砂 ECC 中的纤维表面多个位置被刮削,出现丝状破坏。对其机理进行分析可知:石英砂 ECC 中纤维表面附着物最少,减小了纤维与基体之间的界面摩擦力<sup>[5]</sup>,可能会导致界面黏结力过小,同时在纤维拔出过程中纤维表面受到的破坏最严重会直接导致纤维作用的难以完全发挥<sup>[22]</sup>,最终使其抗折性能最差;河砂 ECC 中虽然纤维表面附着物稍多,但可能对此次试验所制备的 ECC 界面黏结强度影响稍弱,同时其纤维表面较为完整,纤维能较好地发挥其桥联作用,最终其抗折性能最优;沙漠砂 ECC 中纤维表面附着物较少,一定程度上降低了界面摩擦黏结力,同时纤维表面有少许刮削痕迹,最终抗折性能处于其余两者之间。综上所述,从微观结构并结合宏观力学性能来看,全沙漠砂替代石英砂和普通河砂制备 ECC 可行。

## 2.2 沙漠砂 ECC 单轴压缩尺寸效应分析

基于 2.1 所得试验结果,使用全沙漠砂制备 ECC 材料,并对不同尺寸的试件进行单轴受压性能试验。

### 2.2.1 截面尺寸和高厚比对试件破坏形态的影响

如图 5(a)、5(b) 所示:2 种不同截面尺寸的立方体试件表面均出现多条斜向平行裂缝,最终试件沿着主要裂缝斜向剪切破坏,表面有轻微的脱落现象,但试件整体性较好,并未坍塌破碎。但随试件截面尺寸增大,试件破坏程度加重。分析认为其机理主要有两方面:一是随着立方体试件截面尺寸增大,其内部空隙、裂缝或局部缺陷机率增大,材料匀质性降低,致使力学性能劣化<sup>[26]</sup>;另一方面是试件尺寸越大,试验机对试件上下面的“环箍效应”越不明显,导致试件破坏更严重<sup>[26-27]</sup>。

如图 5(b)~5(d) 所示:对于高厚比分别为 1、3、4 的试件,其表面均出现多条斜向裂缝,主裂缝更加明显,同时多条微裂缝沿着主裂缝分叉,延伸,最终试件沿着主裂缝开裂破坏。当高厚比大于 1 以后,随着高厚比的增大,主裂缝与轴向压力作用方向的夹角呈现减小趋势。分析其机理可能是由于高厚比的增大使试件受到的“环箍效应”减弱,从而其开裂路径发生了改变,试件中部接近单向均匀受压状态<sup>[13,15]</sup>,最终沙漠砂 ECC 试件破坏裂缝与竖向压应力之间的夹角逐渐减小。

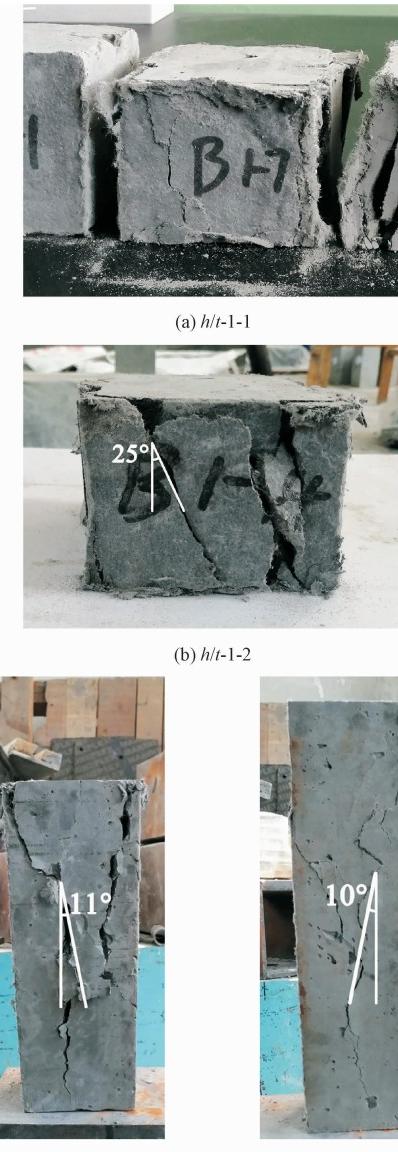


图 5 试件的破坏形态

Fig. 5 The failure form of specimens

### 2.2.2 截面尺寸和高厚比对强度的影响

沙漠砂 ECC 试件单轴压缩试验强度结果见表 7,图 6 为其强度随截面尺寸、高厚比变化对比图。

表 7 立方体和棱柱体抗压强度试验结果

Tab. 7 Results of cube and prism compressive strength test

尺寸/mm	组别	试件数量/个	抗压强度/MPa	标准差/MPa	变异系数
70.7×70.7×70.7	h/t-1-1	6	44.67	1.64	0.037
100×100×100	h/t-1-2	6	43.28	1.45	0.034
150×150×150	h/t-1-3	6	39.55	1.44	0.036
100×100×300	h/t-3	6	35.99	1.25	0.035
100×100×400	h/t-4	6	34.70	2.41	0.069

注:组别中  $h/t$  指高厚比,第一个数字为对应的高厚比的大小,第二个为组号,即  $h/t-1-1$  表示高厚比为 1 的第 1 组, $h/t-3$  表示高厚比为 3 的组。

从图 6 可以看出:随着截面尺寸的增大,沙漠砂 ECC 立方体的抗压强度逐渐降低,与普通砂 ECC 结论相同<sup>[16]</sup>;随着高厚比的增大,沙漠砂 ECC 试件轴心抗压强度也呈逐渐降低的变化趋势;但当高厚比大于 1 后,随着高厚比的增加,沙漠砂 ECC 试件强度降低幅度逐渐减小,与普通砂 ECC 的结论一致<sup>[13,15]</sup>,而与普通混凝土试件高厚比为 2 及其以上,强度才趋于稳定不同<sup>[28]</sup>,一方面可能是因为沙漠砂的细度模数比普通砂小,沙漠砂可以更好地改善材料的级配,增加了水泥基复合材料的密实度,削弱了高厚比对沙漠砂 ECC 棱柱体抗压强度的影响;另一方面混凝土的脆性对于高厚比与强度之间的关系也有很大的影响<sup>[29]</sup>,而 ECC 具有高韧性<sup>[15]</sup>,所以高厚比对其强度的影响规律与普通混凝土不同。

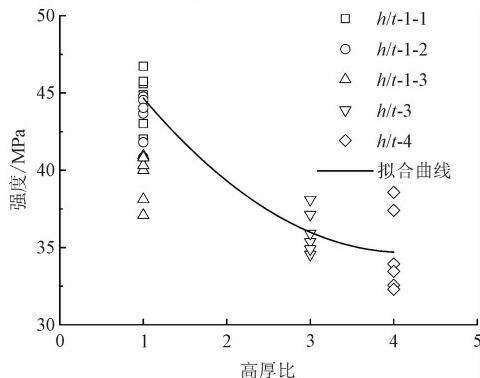
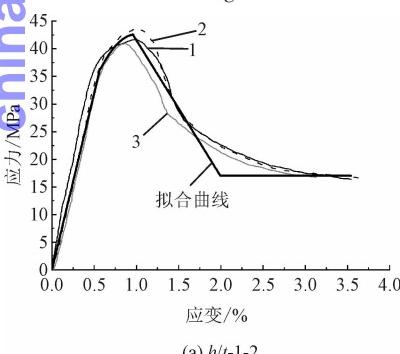
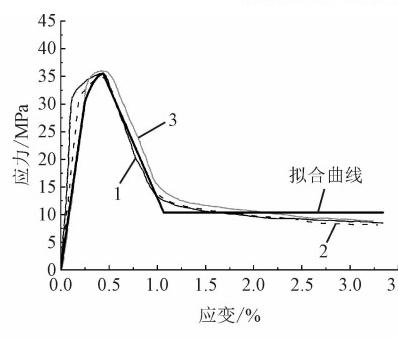


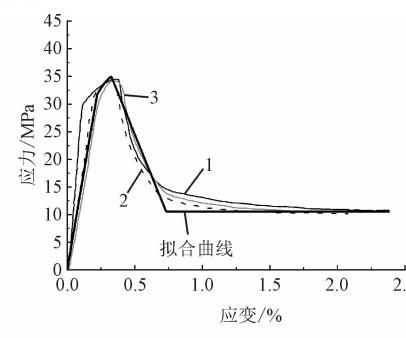
图 6 强度随截面尺寸、高厚比变化对比图  
Fig. 6 Comparison of strength with section sizes and height-thickness ratios



(a)  $h/t=1-2$



(b)  $h/t=3$



(c)  $h/t=4$

图 7 不同高厚比下沙漠砂 ECC 试件单轴受压应力-应变曲线图

Fig. 7 Uniaxial compression stress-strain curves of desert sand ECC specimens with different height-thickness ratio

根据应力-应变全曲线的形状和裂缝发展情况,并且参考文献[13,15]的应力-应变曲线,可将沙漠砂 ECC 的单轴压缩过程分为以下 4 个阶段:弹性阶段、裂缝发展阶段、裂缝失稳扩展阶段和残余软化阶段。虽然试件在残余软化阶段几乎成为一个在部分纤维连接作用下的“机构”<sup>[15]</sup>,但试件仍有一定的残余强度。为进一步分析高厚比对峰值应变的影

响,用 origin 对不同高厚比试件的试验数据进行拟合分析,得到了高厚比与强度之间的关系,拟合曲线如图 6 所示,表达式为

$$\sigma = 49.27 - 6.78(h/t) + 0.78(h/t)^2 \quad (1)$$

式中: $\sigma$  为试件抗压强度; $h/t$  为试件高厚比。

从图 6 可以看出:拟合曲线与试验数据吻合较好,说明式(1)可以用来表达高厚比与沙漠砂 ECC 抗压强度的关系。

### 2.2.3 不同高厚比下试件应力-应变全曲线

不同高厚比下试件的力学性能指标如表 8 所示,其对应的应力-应变曲线如图 7 所示。

表 8 不同高厚比试件力学性能指标

Tab. 8 Mechanical properties indexes of different height-thickness ratio specimens

尺寸/mm	组别	试件数量/个	弹性模量/GPa	峰值应变/%	峰值应力/MPa
100 × 100 × 100	$h/t=1-2$	3	7.10	0.934	42.04
100 × 100 × 300	$h/t=3$	3	19.57	0.411	35.43
100 × 100 × 400	$h/t=4$	3	19.39	0.349	34.36

注:表中数据均为每组试验结果的平均值

从表 8 的结果可以看出:随着高厚比的增大,沙漠砂 ECC 试件弹性模量是先增大后减小,峰值应变以及峰值应力呈逐渐降低的变化趋势;但当高厚比大于 1 后,沙漠砂 ECC 试件的上述力学性能指标降低幅度逐渐减小。

高厚比与峰值应变的关系式见式(2)。

$$\varepsilon_m = \begin{cases} -0.26h/t + 1.20 & h/t \leq 3 \\ -0.06h/t + 0.60 & 3 < h/t \leq 4 \\ 0.36 & h/t > 4 \end{cases} \quad (2)$$

式中  $\varepsilon_m$  为峰值应变。

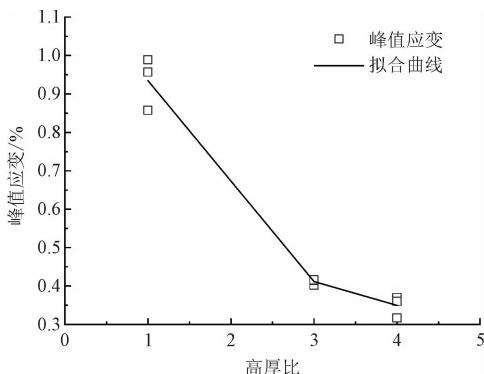


图 8 峰值应变与高厚比的关系曲线

Fig. 8 The relation curve between peak strain and height-thickness ratios

根据试验所得的应力-应变全曲线,参考普通混凝土和文献[15]中的相关模型,提出了4段式的全沙漠砂ECC棱柱体受压应力-应变全曲线模型,如图9所示,各阶段应力-应变表达式见式(3)~(6)所示。

$$OA \text{ 段: } \sigma = \sigma_m \times 1.44 \times \varepsilon_a \quad \varepsilon \leq 0.6\varepsilon_m \quad (3)$$

$$AB \text{ 段: } \sigma = \sigma_m (0.3 + 1.3\varepsilon_a - 0.6\varepsilon_a^2) \\ 0.6\varepsilon_m < \varepsilon \leq \varepsilon_m \quad (4)$$

$$BC \text{ 段: } \sigma = \sigma_m [(-0.85 - \gamma)\varepsilon_a + (1.85 - \gamma)] \\ \varepsilon_m < \varepsilon \leq 2.23\varepsilon_m \quad (5)$$

$$CD \text{ 段: } \sigma = \gamma\sigma_m \quad 2.23\varepsilon_m < \varepsilon \quad (6)$$

其中: $\sigma_m$ 为峰值应力; $\varepsilon_a = \varepsilon/\varepsilon_m$ , $\varepsilon_m$ 按式(2)取值; $\gamma$ 为高厚比对残余强度的影响系数,取值见式(7)。

$$\gamma = \begin{cases} 0.45 - 0.5(h/t) & h/t \leq 3 \\ 0.3 & h/t > 3 \end{cases} \quad (7)$$

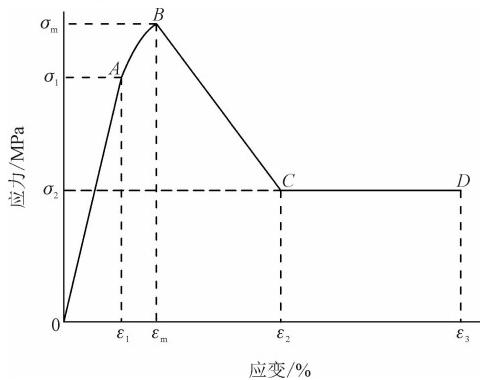


图 9 应力-应变全曲线模型

Fig. 9 The stress-strain full curve model

从图7可以看出本研究所提出的不同高厚比下应力-应变全曲线模型与试验所得应力-应变全曲线吻合较好,此模型适用于不同高厚比的沙漠砂ECC。

### 3 结 论

通过对3种砂制备的ECC的宏观力学性能和

微观结构的比较分析,以及全沙漠砂ECC单轴受压尺寸效应的研究,得到以下主要结论。

1)采用全沙漠砂制备高延性水泥基材料可行。采用沙漠砂制备的ECC,轴心抗拉强度最大;使用河砂制备的ECC,抗压强度和抗折强度最大。

2)沙漠砂ECC纤维表面的附着物较少且纤维外形貌较完整的两个特征均有利于纤维桥联作用的发挥。

3)沙漠砂ECC试件受压破坏后完整性较好;立方体试件截面尺寸越大,破坏情况越严重,裂缝越明显;高厚比越大,试件破坏时主裂缝与竖向压应力的夹角越小。

4)截面尺寸和高厚比的增大,均会导致沙漠砂ECC抗压强度的降低;当高厚比大于1以后,高厚比对沙漠砂ECC棱柱体抗压强度的影响逐渐减小;提出的高厚比与抗压强度的关系表达式与试验结果吻合较好。

5)高厚比越大,残余强度越低,且高厚比大于1以后,残余强度基本相同;提出的应力-应变全曲线模型可以用来描述不同高厚比下全沙漠砂ECC的受压应力-应变关系。

### 参 考 文 献:

- [1] LI V C. On engineered cementitious composites (ECC): A review of the material and its applications [J]. Journal of advanced concrete technology, 2003, 1(3):215-230.
- [2] LI V C, WANG S X, WU C. Tensile strain-hardening behavior of polyvinyl alcohol engineered cementitious composite (PVA-ECC) [J]. ACI materials journal, 2001, 98(6):483-492.
- [3] LI V C. Advances in ECC research [J]. ACI symposium publication, 2002, 206:373-400.
- [4] 褚洪岩,蒋金洋,李荷,等.环保型细集料对超高性能混凝土力学性能的影响[J].材料导报,2020,34(24):24029-24033.  
CHU Hongyan, JIANG Jinyang, LI He, et al. Effects of eco-friendly fine aggregates on mechanical properties of ultra-high performance concrete [J]. Materials reports, 2020, 34 ( 24 ) : 24029-24033 ( in Chinese ).
- [5] 张艺馨.沙漠砂制备高韧性纤维增强水泥基复合材料单轴拉/压力学性能分析[D].银川:宁夏大学,2019.
- [6] MENG D, HUANG T, ZHANG Y X, et al. Mechanical behaviour of a polyvinyl alcohol fibre reinforced engineered cementitious composite (PVA-ECC) using local ingredients [J]. Construction and building materials, 2017, 141:259-270.
- [7] 李祚,姚淇耀,朱圣焱,等.乌兰布和沙漠砂制备高延性水泥基复合材料的力学性能[J].硅酸盐通报,2021,40(4):1103-1115.  
LI Zuo, YAO Qiyo, ZHU Shengyan, et al. Mechanical properties of engineered cementitious composites prepared with sand in Ulanbuh desert [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40 ( 4 ) :

- 1103-1115 (in Chinese).
- [8] 王丹. 高韧性沙漠砂水泥基复合材料配合比设计和力学性能研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2020.
- [9] 生兆亮, 辛欣, 夏多田, 等. 纤维增强水泥基材料强度和微结构的影响因素研究[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(10): 3108-3114.  
SHENG Zhaoliang, XIN Xin, XIA Duotian, et al. Influence factors of strength and microstructure of fiber reinforced cement-based materials[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39(10): 3108-3114 (in Chinese).
- [10] GONNERMAN H F. Effect of size and shape of test specimen on compressive strength of concrete[C]//Proceedings of the American Society for Testing and Materials. [S. l. ] : ASTM, 1925; 237-250.
- [11] 黄海燕, 张子明. 混凝土的尺寸效应[J]. 混凝土, 2004(3): 8-9.  
HUANG Haiyan, ZHANG Ziming. Size effect in concrete[J]. Concrete, 2004(3): 8-9 (in Chinese).
- [12] 李雪阳, 江世永, 飞渭, 等. 高韧性水泥基复合材料强度尺寸效应试验研究与正交分析[J]. 中国材料进展, 2017, 36(6): 473-478.  
LI Xueyang, JIANG Shiyong, FEI Wei, et al. Experimental study and orthogonal analysis of strength size effect of high toughness cementitious composite[J]. Materials China, 2017, 36(6): 473-478 (in Chinese).
- [13] 江世永, 陶帅, 姚未来, 等. 高韧性纤维混凝土单轴受压性能及尺寸效应[J]. 材料导报, 2017, 31(24): 161-168.  
JIANG Shiyong, TAO Shuai, YAO Weilai, et al. Mechanical performance and size effect of engineered cementitious composite (ECC) subjected to uniaxial compression[J]. Materials review, 2017, 31(24): 161-168 (in Chinese).
- [14] 邓明科, 常云涛, 梁兴文, 等. 高延性水泥基复合材料抗压强度尺寸效应的正交试验研究[J]. 工业建筑, 2013, 43(7): 80-85.  
DENG Mingke, CHANG Yuntao, LIANG Xingwen, et al. Orthogonal test research on compressive strength size effect of engineered cementitious composites[J]. Industrial construction, 2013, 43(7): 80-85 (in Chinese).
- [15] 李庆华, 周宝民, 黄博滔, 等. 超高韧性水泥基复合材料抗压性能的尺寸效应研究[J]. 水利学报, 2015, 46(2): 174-182.  
LI Qinghua, ZHOU Baomin, HUANG Botao, et al. The size effect of compressive properties of ultra high toughness cementitious composites (UHTCC)[J]. Journal of hydraulic engineering, 2015, 46(2): 174-182 (in Chinese).
- [16] YU K Q, DING Y, ZHANG Y X. Size effects on tensile properties and compressive strength of engineered cementitious composites[J]. Cement and concrete composites, 2020, 113: 103691.
- [17] 生兆亮, 夏多田, 程建军. 沙漠砂-PVA 纤维增强水泥基材料的试验研究[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2021, 39(3): 301-306.  
SHENG Zhaoliang, XIA Duotian, CHENG Jianjun. Experimental study on desert sand-PVA fiber reinforced cement base material[J]. Journal of Shihezi University(natural science), 2021, 39(3): 301-306 (in Chinese).
- [18] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 水泥胶砂强度检验方法(ISO法): GB/T 17671-2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [19] 中华人民共和国工业和信息化部. 高延性纤维增强水泥基复合材料力学性能试验方法: JC/T 2461-2018[S]. 北京: 中国建材工业出版社, 2018.
- [20] 中国工程建设标准化协会. 纤维混凝土试验方法标准: CECS 13-2009[S]. 北京: 中国计划出版社, 2010.
- [21] 黄灵芝, 柯梅尉, 司政, 等. 冻融损伤混凝土单轴压缩细观破坏研究[J]. 应用力学学报, 2021, 38(4): 1400-1407.  
HUANG Lingzhi, KO Meiwai, SI Zheng, et al. Research on meso failure of concrete subjected to freeze-thaw damage under uniaxial compression[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2021, 38(4): 1400-1407 (in Chinese).
- [22] 郭丽萍, 陈波, 孙伟, 等. 骨料类型及纤维对高延性水泥基复合材料性能的影响[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2017, 47(6): 1221-1226.  
GUO Liping, CHEN Bo, SUN Wei, et al. Effects of aggregate type and fibre on properties of high ductility cementitious composites[J]. Journal of Southeast University (natural science edition), 2017, 47(6): 1221-1226 (in Chinese).
- [23] LUO F J, HE L, PAN Z, et al. Effect of very fine particles on workability and strength of concrete made with dune sand[J]. Construction and building materials, 2013, 47: 131-137.
- [24] 张建智, 蔡志达, 李隆盛, 等. 骨料裹浆厚度对混凝土性质影响之研究[J]. 建筑材料学报, 2009, 12(4): 384-389.  
ZHANG Jianzhi, CAI Zhida, LI Longsheng, et al. Effects of paste thickness on coated aggregates on properties of concrete[J]. Journal of building materials, 2009, 12(4): 384-389 (in Chinese).
- [25] 耿晔晗, 郭志红. 砂的颗粒组成对砂浆强度影响的试验研究[J]. 混凝土, 2011(8): 118-120.  
GENG Yehan, GUO Zihong. Experimental study on the influences of grain composition of sand on mortar strength[J]. Concrete, 2011(8): 118-120 (in Chinese).
- [26] 李东波, 张鸿驰, 刘春燕, 等. 氧化石墨烯与粉煤灰增强水泥基材料的协同机理及其抗压性能尺寸效应[J]. 应用力学学报, 2021, 38(5): 1869-1876.  
LI Dongbo, ZHANG Hongchi, LIU Chunyan, et al. Synergistic mechanisms and size effect of cement-based materials enhanced by graphene oxide and fly ash[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2021, 38(5): 1869-1876 (in Chinese).
- [27] 朱长书, 孙林柱, 王雨, 等. PVA 纤维增强水泥基材料尺寸效应及相关性能研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2015(12): 58-61.  
ZHU Changshu, SUN Linzhu, WANG Yu, et al. Size effects and related mechanical properties of PVA fiber reinforced cementitious composite material[J]. China concrete and cement products, 2015(12): 58-61 (in Chinese).
- [28] 过镇海, 时旭东. 钢筋混凝土原理和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [29] 吴智敏, 杨树桐, 郑建军. 混凝土等效断裂韧度的解析方法及其尺寸效应[J]. 水利学报, 2006, 37(7): 795-800.  
WU Zhimin, YANG Shutong, ZHENG Jianjun. Analytical method for predicting effective fracture toughness of concrete and its size effect[J]. Journal of hydraulic engineering, 2006, 37(7): 795-800 (in Chinese).